

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.01.017

近断层地震动作用下进水塔的地震反应分析

陈曦¹, 刘云贺¹, 周邠鹏²

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了研究近断层脉冲型地震动向前方向性效应和滑冲效应引起的速度脉冲对进水塔结构的地震反应。在文摘中选取台湾集集地震、美国加州北岭地震两次倾滑断裂地震中含强脉冲的 30 条原始地震波为输入波, 对实际工程结构中的进水塔及启闭机室结构基于受力特点建立了简化计算模型。基于 Matlab 编制了进水塔地震动反应分析程序, 通过输入 30 条典型近断层地震动, 得到了进水塔及启闭机室地震响应。结果表明: 在近断层地震动作用下, 启闭机室加速度响应均发生了突变, 进水塔加速度响应平均值均放大。近断层脉冲型地震动对启闭机室鞭梢效应放大作用大于无速度脉冲地震动的影响, 其中含向前方向性脉冲效应的近断层地震动对启闭机室加速度放大最为明显, 塔顶及启闭机室的分段截面转角最为明显。说明三组近断层地震动中, 脉冲型地震动对刚度突变的启闭机室部分影响大于无速度脉冲的近断层地震动, 含向前方向性脉冲效应的近断层地震动对进水塔变形影响最大。

关键词: 近断层地震动; 进水塔结构; 向前方向性效应; 滑冲效应; 地震反应

中图分类号: TV671 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2020)01-0122-07

Seismic response analysis of intake tower under near-fault ground motions with forward directivity and fling-step effects

CHEN Xi¹, LIU Yunhe¹, ZHOU Binpeng²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: This paper examines the influence of near-fault ground motions with different velocity pulses due to forward directivity and fling-step effects on the seismic responses of intake tower structure. 30 typical near-fault strong impulsive records in the Chi-Chi earthquake and North bridge dip-slip earthquake are taken as the input. The structure of intake tower and hoist chamber in actual engineering structure are simplified from the mechanical point of view. MATLAB program is used for the analysis program seismic response of intake tower. Thirty typical near-fault ground motion records are input in MATLAB program, with the seismic responses of the intake tower obtained. The results show that the acceleration response of hoist chamber is suddenly changed under near-fault ground motions. The average acceleration responses of the intake tower are amplified. The amplification action of whipping effect of the near-fault ground motions with forward directivity and fling-step effects on the hoist chamber whip slightly effect is greater than the influence of non-pulse ground motions. Near-fault ground motions with forward directivity pulse effect have the most obvious effect on acceleration amplification of hoist chamber and have the most maximum section angle of the top of intake tower and hoist chamber. The study shows that in the three groups of near-fault ground motions, the impact of pulsed ground motions on the hoist chamber is greater than that of non-velocity pulsed near-fault ground motions. Near-fault ground motion with the forward directional pulse effect has the greatest effect on the deformation

收稿日期: 2019-10-25; 网络出版日期: 2020-04-23

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200423.1123.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179154)

第一作者: 陈曦, 女, 硕士, 讲师, 研究方向为水工结构抗震。E-mail: cxz1109@xaut.edu.cn

of the intake tower.

Key words: near-fault ground motion; intake tower structure; forward-directivity effect; fling-step effect; seismic response

近 20 年来我国地震频发,例子有 1999 年台湾集集地震、2008 年汶川地震、2013 年芦山地震、2014 年云南鲁甸地震等^[1-8]。这些地震均对各类工程结构造成了巨大的破坏,但也获得了近断层地震动记录。大部分学者认为近断层地震是指断层地震动会受到断层的各种特点诸如破裂形成机理、断层规模、破裂类型等影响的地震,根据大多数学者的统一定义,把断层破裂面小于 20 km 范围内的区域看作是近断层区域。近断层地震动强烈依赖于断层破裂机制,其独特的破裂向前方向性效应和滑冲效应均导致地震动速度时程中出现明显的大幅值、长周期脉冲。这类速度脉冲易使工程结构发生严重破坏,引起地震工程界的广泛关注和研究。在近断层地震动及其对结构破坏效应的研究方面,已有国内外学者做了大量的相关工作。Tian 等^[9]用三维有限元程序模拟了近断层地震动作用下输电塔的倒塌损伤计算,研究了输电塔在台湾集集地震作用下的倒塌机理。Yazdani 等^[10]研究了 Pine Flat 重力坝的地震动响应,表明近断层脉冲型地震动会影响大坝响应。Zou 等^[11]针对近断层地震动作用下坝体稳定性分析,开发了土坡稳定程序,来计算大坝在近断层地震动作用下大坝实时滑移,结果表明近断层脉冲型地震动对堆石坝滑移会产生相当大的影响。目前,在水工建筑物的近断层地震效应研究主要是针对坝体结构影响,但对进水塔的相关研究尚未见报道。因此,研究在近断层脉冲型地震动作用下进水塔的地震反应是十分必要的。

进水塔是一种高耸薄壁结构,其地震安全性对水库枢纽正常运行至关重要,甚至威胁到大坝尤其是土石坝的安全性,所以进水塔的抗震性能和稳定性成为进水塔抗震设计的关键^[12-13]。对于当坝址附近发生近断层地震时,脉冲效应对水工建筑物结构系统动力反应具有显著的影响^[12]。在四川汶川地区发生地震时出现脉冲型近断层地震波,且汶川地震紫坪铺进水塔启闭机室受到破坏,也说明在水利资源广泛利用地区亦有可能出现区别于远场地震的近断层地震震害。当前进行进水塔结构抗震分析时,输入地震动一般采用实际地震动输入或者根据规范设定的地震加速度代表值设定输入地震动^[12-13],未考虑近断层地震动的影响并不利于进水塔结构系统抗震,因此需要针对这一问题开展深入的研究。

为了研究近断层地震作用下进水塔结构的动力

反应,选取 30 条地震近断层地震动记录,按向前方向性效应脉冲、滑冲效应脉冲及无速度脉冲进行分组输入,针对四川某地大坝进水塔的结构抓住主要受力特点,从力学角度进行了简化,利用 MATLAB 软件,运用时程分析法中的 Newmark- β 法编写程序,在 MATLAB 程序中输入了 30 条典型近断层地震动记录,计算进水塔简化结构动力响应,研究结构系统在近断层地震动作用下地震反应的基本规律,为进水塔抗震设计提供参考。

1 近断层地震动工程特性及其参数

通常,在近断层地震动的近断层区域,地震动特性和远离断层的地震动相比有十分显著的特征,如近断层破裂的方向性效应和滑冲效应。

本论文输入地震动(见表 1)选取来自于两次倾滑断裂地震中的 3 组地震动记录数据作为地震动输入,两次地震分别为 1994 年 1 月 17 日美国加州北岭 6.6 级地震和 1999 年 9 月 21 日台湾集集 7.6 级地震。其中台湾集集地震中记录到有滑动脉冲的速度脉冲地震动记录,美国加州北岭地震则只记录到有破裂向前方向性的速度脉冲地震动记录。地震动的峰值地面速度(PGV)与峰值地面加速度(PGA)之比可反映地震动的频谱特征,若地震动含有速度脉冲时,PGV/PGA 值较大,特征周期较长,当地震动为无脉冲时,PGV/PGA 值较小。以此为标准,分别选取具有破裂向前方向性效应的速度脉冲、具有滑冲效应的速度脉冲、无速度脉冲的地震动记录各 10 条。为了避免调幅对真实地震波的影响所以对输入地震动并没有进行调幅处理,实际近断层地震动记录的断层距、场地条件、PGA、PGV 等都有些差别。为了研究真实近断层地震动对结构的动力反应影响未对地震记录进行调幅,经过调幅处理的近断层地震动将会干扰地震动的工程特性和结构效应^[14]。因为我国强震观测台站数量及强震观测的数据资料较少,所以选择强震数据多采用了美国或者台湾地区强震地震动数据。由于我国的抗震规范对场地分类与其他地区有所不同,根据郭锋等^[15]对比不同地区的分类指标,因为两地区规范均采用等效剪切波速作为场地分类指标,根据计算原理相同,所以彼此之间有不同分类指标对应关系,根据这个对应关系,重新对所采用的台湾集集地震记录场地进行了分类,表 1 中所采用的场地分类为美国规范场地分类。

表1 近断层地震动的特征参数
Tab.1 Property parameters of three groups of near-fault ground motions

地震动特征	台站及分量	断层距/km	场地类型	PGA/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	PGV/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	PGD/cm	PGV与PGA之比/s	t_d/s
向前方向性效应脉冲	TCU051 EW	6.95	D	160	51.53	124.52	0.27	24.18
	TCU054 EW	4.64	D	146	45.69	121.47	0.32	23.98
	TCU082 EW	4.47	D	226	51.54	152.35	0.23	23.28
	TCU102 EW	1.19	D	304	87.16	163.13	0.29	14.93
	TCU120 EW	9.87	C	228	62.58	107.63	0.28	32.35
	JEN 022	5.43	D	424	106.22	43.06	0.26	12.42
	RRS 228	6.50	D	838	166.05	28.78	0.20	7.03
	SCE 288	5.19	D	493	74.58	28.69	0.15	7.53
	SCS 052	5.35	D	612	117.45	53.47	0.20	15.10
	SYL 360	5.30	D	843	129.71	32.68	0.16	5.32
均值				427	89.251	85.578	0.236	16.612
滑冲效应脉冲	TCU052 NS	1.84	D	448	220.64	723.27 (676.90)	0.50	15.92
	TCU052 EW	1.84	D	356	182.96	506.73 (-443.10)	0.52	16.78
	TCU065 EW	2.49	D	789	132.29	194.31 (134.20)	0.17	28.78
	TCU067 EW	1.11	D	499	97.26	186.16 (102.95)	0.20	21.71
	TCU068 NS	3.01	D	365	291.94	867.76 (619.30)	0.82	13.21
	TCU068 EW	3.01	D	505	279.88	709.11 (-567.30)	0.57	12.36
	TCU075 EW	3.38	D	332	116.05	171.07 (120.00)	0.36	26.92
	TCU076 EW	3.17	D	343	69.29	108.55 (87.56)	0.21	29.68
	TCU087 NS	3.42	C	113	45.20	93.09 (-81.23)	0.41	24.10
	TCU128 EW	9.08	C	144	60.58	145.39 (118.80)	0.43	19.20
均值				389	149.61	370.544(295.134)	0.419	20.866
无速度脉冲	TCU071 EW	4.88	D	528	69.83	170.60	0.08	24.56
	TCU072 EW	7.87	D	476	85.51	223.86	0.18	21.92
	TCU078 EW	8.27	D	442	42.14	98.88	0.10	25.95
	TCU079 EW	10.95	D	589	64.49	173.20	0.11	24.24
	TCU089 EW	8.33	C	354	45.43	194.62	0.13	24.11
	KAT 090	13.42	D	640	37.84	5.09	0.06	6.57
	PKC 360	7.26	D	433	51.49	7.21	0.12	9.82
	SPV 360	8.44	D	939	76.60	14.95	0.08	8.20
	STC 180	12.09	D	477	61.48	22.06	0.13	10.61
	TAR 360	15.60	D	990	77.62	30.45	0.08	12.66
均值				559	61.243	90.092	0.107	16.864

注:PGD表示峰值地面位移,括号内数字代表含滑冲效应的近断层地震动的滑冲位移。

2 近断层地震动作用下进水塔结构的地震反应分析

2.1 工程概况

以四川某地大型水坝进水塔结构为实际工程背景,进水塔进水口与坝顶同高。图 1 为进水塔结构的断面图,塔底宽 26 m,进水塔顶部高程 88 m,启闭机室顶部高程为 107 m 总高为 107 m。

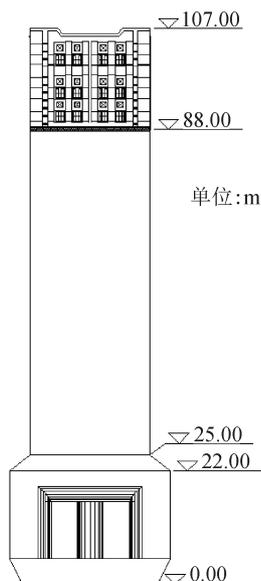


图 1 水塔典型断面

Fig. 1 Typical section of the intake tower

2.2 数学分析及力学模型

基于 MATLAB 软件强大的仿真计算能力,为了研究进水塔结构和上部启闭机室在近断层地震动作用下的动力响应,抓住进水塔结构主要受力特点进行了力学简化,将塔式进水塔结构简化为两段由剪切梁和弯曲梁组合的悬臂结构。按照进水塔截面变化而产生不同的惯性矩分为不同段,从而将进水塔塔体部分简化为弯曲悬臂梁结构,而把上部启闭机室的框架结构简化为剪切梁,其力学简化图见图 2。悬臂结构考虑弯曲变形的基础上进一步计入了剪切变形影响。启闭机房框架结构简化为剪切梁,程序利用时程分析法中的 Newmark- β 法,求出进水塔结构沿分段截面所变化的截面最大加速度、截面转角和截面间最大剪力等地震响应。对于进水塔悬臂分层单元可用平面梁单元来模拟,图 3 为平面梁单元受力与变形图。

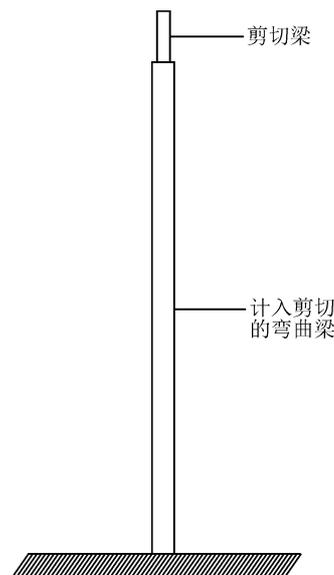


图 2 进水塔连同启闭机室简化模型

Fig. 2 Simplified model of the intake tower and hoist chamber

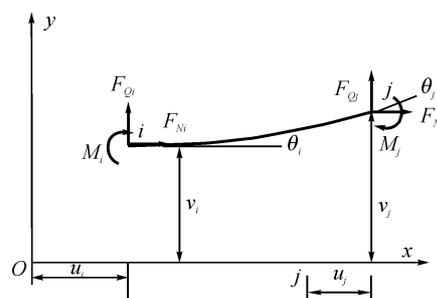


图 3 平面梁单元受力和变形

Fig. 3 Force and deformation of plane beam element

图 3 中: M_i 、 F_{Qi} 、 F_{Ni} 为单元 i 端的弯矩、剪力和轴力, M_i 、 F_{Qi} 、 F_{Ni} 正方向见图 3; u_i 、 v_i 、 θ_i 为单元 i 端的水平位移、竖向位移及转角位移,正方向见图 3。

单元(上标 e 表示)杆端的位移向量 δ^e 可表示为:

$$\delta^e = [u_i \quad v_i \quad \theta_i \quad u_j \quad v_j \quad \theta_j]^T \quad (1)$$

单元杆端的受力向量 F^e 可表示为:

$$F^e = [F_{Ni} \quad F_{Qi} \quad M_i \quad F_{Nj} \quad F_{Qj} \quad M_j]^T \quad (2)$$

单元杆端的位移向量和受力向量之间关系如下:

$$F^e = K^e \delta^e \quad (3)$$

由于在进水塔塔体部分虽仍以弯曲变形为主,但其剪切变形的影响较大,也应考虑。因此,把平面梁单元的刚度矩阵 K^e 表达如下:

表2 三组近断层地震动作用下进水塔及启闭机室加速度放大系数

Tab. 2 Magnification acceleration of simplified model of the intake tower and hoist chamber with near-fault ground motion

参数	向前方向性脉冲		滑冲脉冲		无脉冲	
	加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	加速度放 大系数	加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	加速度放 大系数	加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	加速度放 大系数
启闭机室顶部加速度响应	49.062	3.66	31.080	3.43	46.374	3.03
塔顶加速度响应	13.413		9.052		15.315	

2.4 近断层地震动作用下进水塔及启闭机室分段转角响应分析

由图6、图7可以看出,随着高度增加,进水塔及在启闭机室的分段截面转角逐渐变大,最大分段截面出现在启闭机室第二层。由于鞭梢效应影响,进水塔的启闭机室的分段转角在三种地震动作用下均被放大。在三种地震动中,含向前方向性效应脉冲的近断层地震动作用下启闭机室的分段截面转角最大。

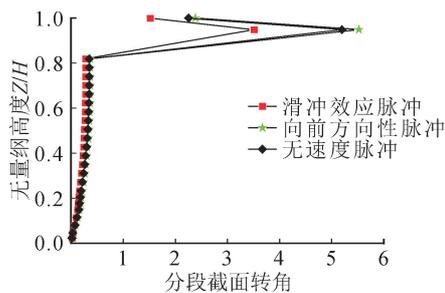


图6 近断层地震动作用下简化进水塔及启闭机室模型分段截面转角平均值

Fig. 6 Mean maximum section angle of the intake tower and hoist chamber with near-fault ground motion

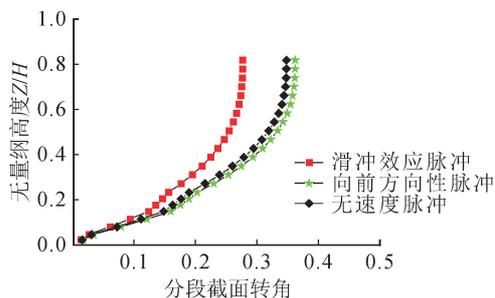


图7 近断层地震动作用下简化进水塔模型分段截面转角平均值

Fig. 7 Mean maximum section angle of the intake tower with near-fault ground motion

由图7可看出,塔体部分的最大分段截面转角出现在塔顶,依旧是含向前方向性脉冲效应的近断层地震动作用下的分段截面转角最大,向前方向性脉冲地震动的塔顶最大分段截面转角为无速度脉冲

的1.04倍,为滑冲效应脉冲的1.31倍。说明在三组近断层地震动作用下,含向前方向性脉冲的近断层地震动作用下的进水塔及启闭机室动力反应最大,也说明含向前方向性脉冲的近断层地震动对进水塔结构变形的影响最大。

3 结论

1) 在近断层脉冲型地震动作用下,进水塔及启闭机室加速度均随高度增加而增大,由于鞭梢效应,启闭机室简化部分加速度响应均发生了突变,加速度响应平均值均放大,启闭机室的鞭梢效应表现明显。

2) 对三组30条近断层脉冲型地震动的加速度响应分析,可见脉冲型地震动对刚度突变的启闭机室部分影响大于无速度脉冲的近断层地震动。

3) 对三组30条近断层脉冲型地震动的分段截面转角响应分析,可见含向前方向性脉冲的近断层地震动作用下进水塔及启闭机室的动力反应最大,也说明含向前方向性脉冲的近断层地震动对进水塔结构变形的影响最大。

参考文献:

- [1] 谢俊举,李小平,温增平,等. 芦山7.0级地震近断层地震动的方向性[J]. 地球物理学报, 2018, 61(4): 1266-1280.
XIE Junju, LI Xiaoping, WEN Zengping, et al. Variations of near-fault strong ground motion with directions during the 2013 Lushan M_s 7.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(4): 1266-1280.
- [2] 和嘉吉,卢永坤,代博洋,等. 2014年云南地震灾害综述[J]. 地震研究, 2015, 38(4): 638-642.
HE Jiaji, LU Yongkun, DAI Boyang, et al. Overview of earthquakes disaster in Yunnan in 2014[J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(4): 638-642.
- [3] 陈文山. 台湾集集7.6级地震之车笼埔断层活动特征及其危害[J]. 城市与减灾, 2018(1): 66-71.
- [4] 温增平,谢俊举,徐超. 2008年汶川大地震近断层地震动特征及其工程震害[C]//《2016中国地球科学联合学术年会论文集(十七)》——专题36:强震机理、孕育环境

- 与地震活动性分析、专题 37:强震震害特点及其社会影响》. 北京:中国地震局地球物理研究所,2016.
- [5] 贾俊峰,杜修力,韩强. 近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展[J]. 建筑结构学报,2015,36(1): 1-12.
- JIA Junfeng, DU Xiuli, HAN Qiang. A state-of-the-art review of near-fault earthquake ground motion characteristics and effects on engineering structures[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 1-12.
- [6] ALEMBAGHERI M. Dynamics of submerged intake towers including interaction with dam and foundation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 84: 108-119.
- [7] ALEMBAGHERI M. Earthquake response of solitary slender freestanding intake towers[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 90: 1-14.
- [8] DANG Kangning, LIU Yunhe, ZHANG Jingyi. Dynamic response analysis of intake tower in hydroelectric power station with high surrounding rock[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(3): 2019-2030.
- [9] TIAN Li, PAN Haiyang, MA Ruisheng, et al. Collapse simulations of a long span transmission tower-line system subjected to near-fault ground motions[J]. Earthquakes and Structures, 2017, 13(2): 211-220.
- [10] YAZDANI Y, ALEMBAGHERI M. Effects of base and lift joints on the dynamic response of concrete gravity dams to pulse-like excitations[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2017, 21(5): 840-860.
- [11] ZOU Degao, HAN Huichao, LING H I, et al. An approach for the real-time slip deformation coupled with strain softening of a high rockfill dam subjected to pulse-like ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117: 30-46.
- [12] 李宁,李骞,任堂,等. 汶川地震紫坪铺进水塔的动态响应研究[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(5): 1128-1134.
- LI Ning, LI Qian, REN Tang, et al. Dynamic response analysis of Zipingpu intake tower under Wenchuan earthquake action[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1128-1134.
- [13] 刘云贺,郑晓东,张小刚. 考虑粘弹性人工边界的高耸进水塔结构地震动态响应分析 [J]. 西安理工大学学报,2016,32(2):134-141.
- LIU Yunhe, ZHENG Xiaodong, ZHANG Xiaogang. Considering the analysis of high intake tower seismic dynamic response at the viscoelastic artificial boundary [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(2): 134-141.
- [14] YANG Dixiong, PAN Jianwei, LI Gang. Non-structure-specific intensity measure parameters and characteristic period of near-fault ground motions[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2009, 38 (11): 1257-1280.
- [15] 郭锋,吴东明,许国富,等. 中外抗震设计规范场地分类对应关系[J]. 土木工程与管理学报,2011,28(2): 63-66.
- GUO Feng, WU Dongming, XU Guofu, et al. Site classification corresponding relationship between Chinese and the overseas seismic design codes[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology Urban Science, 2011, 28(2): 63-66.

(责任编辑 王绪迪)